

家屋の耐震設計方針について

武藤清

序

いかにして建物を耐震的な構造にするか？ この問題の解決には我が国の建築家、あるいはこれに関わる学者が永らく努力しているところである。大森博士・辰野博士・中村博士・横河博士、及び佐野博士等の研究により、地震の破壊作用を主として水平震度の観念に統一し、建物を地盤上に構築してある程度の水平力に耐えられるようにして地震に備えようとする今日の構造方法が確立され、多くの建築家はこれを採用している。しかし一方には、さらに理論的に振動の基礎問題からこれを考究し、これとは異なる構造方法を提案する者も少なくない。本論文において、著者はこれらの諸説を考察してその優劣を論じ、最終的には、今日一般に行われているような構造方法を推奨することを結論としている。

家屋の構造方法を耐震論の見地から下のように分類して順次考察しようと思う。

$$\text{家屋構造方法} \left\{ \begin{array}{l} \text{I. 絶縁構造} \\ \text{II. 固定構造} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} 1. \text{ 柔性構造} \\ 2. \text{ 剛性構造} \end{array} \right.$$

絶縁構造

絶縁構造とは、地盤と建物の縁を切った構造方法の意味である。地震をそのまま建物に伝えず、緩衝地帯を通して間接的に伝えようとするものである。これを免震構造あるいは消震構造（訳者注：現在の「制振構造」にあたる）と呼ぶ者もいる。その方法には種々の提案がある。昭和元年頃までのものについては恩師佐野先生が「耐震構造上の諸説」で紹介しており、その後の考案としては建築雑誌上に発表されたものがいくつかある。それらを大別すると下のようになる。

1. 建物をバネ仕掛けで支えるもの
2. 建物を水に浮かすもの
3. 建物をボールの上に自由に転がらせるもの
4. 建物を吊り下げるもの

(1) (2) については疑問であるが、(3) (4) はかなり効果のある方法だと思う。中でも (3) は優れていると思う。その構造方法は建物の基礎面と下面を平らにし、その間にボールを置いたものであるから、地震動を受けても建物を受ける力はボールの回転摩擦力だけになり、地震の威力をそぐことができるのは確かである。(4) は岡隆一氏の考案になるもので、建物を吊って周期を大きくし、地震の急激な振動を避けようという考え方である。それには制動装置があつて、地震力の大小に応じてある時は建物を地盤とともに振動させ、またある時は地盤の拘束を受けずに自由に建物を振動させようとする。細かい点については賛成できないが、その根本の方針には見るべきものがあると考えられる。ようするに (3) の構造法によれば地震に安全な建物が造れるわけである。しかしすべての絶縁構造に共通するのは配管の問題である。上下水、ガス等の処理が非常に面倒なものとなり、費用もかなりかさむと考えられる。

他に耐震的な構造法として確実なものがあるのだから、結局、絶縁構造は実用にはならず、ただの考案のみに終わるものと思われる。

固定構造

固定構造とは建物を地盤に固定して構築する構造法の意味で、地震がそのまま家屋の下底に伝わる。つまり、建物と地震の関係についてのみ言えば、現在のすべての建物がこれに該当する。そして、その構造の方針は便宜上二つの種類に分けることができる。

第一は真島博士が主唱しておられるようなもので、出来るだけ構造を柔にし、建物の上部で地動を感じさせないようにする――これは柔性構造と呼ばれる。第二は建物を出来るだけ剛にして地震動に頑強に対抗させようとするもので、剛性構造と呼ばれる。この二つの構造方法の地震に対する性質を吟味する前に、まず地震の性質について考えてみよう。

破壊的地震の性質

地震動の中で破壊的作用をなすものは主要動であるが、その性質は簡単なものではない。よく地震の強さを表わして、何日の地震は最大振幅〇〇周期〇〇と言うが、これは地震動を単弦運動と仮定する時に最大加速度を生ずる振幅を指すのであって、主要動が一様に同一周期からなると言っているわけではない。そのような意味で言われた大森博士・今村博士その他の諸学者の発表を早呑み込みして「大地震の周期はおよそ 1 秒ないし 1.5 秒である」などと誤解される向きがあることは遺憾である。

大正 12 年の関東大地震とその余震については多数の観測があり、破壊的な地震動の性質が明瞭に分かっている。

今村博士が震災予防調査会報告第 100 号甲に詳しく述べているところによると、9 月 1 時日午前 11 時 58 分 44 秒の大地震の記録は以下のようなものであった（報告 28 頁以降）。

主要動の初めの部分の振動はその周期が平均 1.35 秒で、初めから 3 サイクル後の全振幅は 8.6cm となる。この部分を単弦運動と仮定すれば加速度は 9.8cm/sec^2 となり、震度は約 0.1 である（訳者注. 加速度を $r \cdot (2\pi/T)^2$ として求めている。ここに、 r は半振幅・ T は周期）。その後に一層大きな振幅が現れたが、周期は約 2 秒もしくはそれ以上となり、初発から 40 秒くらいからさらに緩慢な大振動が次々と現れ、1 分半頃になると周期 4 秒ほどの波となり、引き続き、最初から 10 分間ほどはきわめて大きな地動を示している。

主要動の周期は、初めが小さく、それから次第に大きくなるのが通例である。また、震源からの距離が遠いほど概して周期は大きくなる。但馬及び丹後地震の東京における記録を見ると、周期 5 秒ないし 9 秒の緩やかな波動さえある。したがって、地震の周期を 1 秒ないし 2 秒などと限定して考えるのは誤っており、緩やかな地動（訳者注. 周期の大きさ）に上限などないと考えない方がよいくらいである。限度があるのはむしろ急な地動（訳者注. 周期の小ささ）の方である。

関東大地震以前においては、大地震の主要動の周期が 1 秒ないし 2 秒くらいのものとされ、我々はこれくらいが周期の下限であるかのように取り扱ってきた。しかし関東大地震の経験によれば、これよりもさらに急な（訳者注. 周期の小さい）主要動がある。

下表（訳者注. 関東大地震時の各時刻ごとの振幅と周期が No.1 から No.23 まで表に記載されているが、省略）は今村博士の調査になるものであるが、その最大動はよくこの間の消息を示している（最大動とは最大の震度を生んだ振動の意味である）。

この表の 23 の記録中、第 5 号と第 21 号の周期は実に 0.5 秒を示している。しかも第 21 号の全振幅は 1.5cm にも達するのである。周期 0.8 秒のものもある。振幅の比較的大きなものは周期もまた緩やかである。全振幅 5.0cm 以上の大振動のものをみるとたいてい 2 秒前後の周期で、ただ第 1 号だけが 1.35 秒となっている。

これらの地震動は大体主要動の初めの部分である。先に述べたように、これに続いて起きる地震動には、ほぼ同一程度の振幅で周期の緩やかなものが多い。

地震動はもちろん単弦運動ではない。末広博士が言われるように、かなり複雑なものである。したがって、ある波をフーリエ分析して単弦運動の集合と考える時には、その中に急な周期を持つものもかなりあると思われる。しかし、その振幅は割合に小さい。

さて、地震動は実に複雑であり変化が激しいが、とは言え、その不規則な現象の中にかなり規則正しい事実もある。それは、地震の主要動を単弦運動の集合とみなす時、その成分をなす振動は周期 1.5 秒以上のものが振幅・波数ともに多く、周期の小さなものは振幅が小さくて波数も少ない、ということである。震度について見ると、周期 1.5 秒前後の振動が最も大きく、これから遠ざかるに従って小さくなるのである。

固定構造物の振動

地動を受けた建物の振動についての理論は拙著「構造物振動理論」及び「減衰振動について」の中で述べた。これに基づいて振動の考察を行うが、そのためには実際の建物の減衰の性質を明らかにする必要がある。しかし、これに関する的確な研究は今日なお不十分である。

著者はその必要性を感じ、木梁・木構造及び鉄筋コンクリート構造の減衰性を実験しているところだが、まだその途中である。しかしこれまでに得た結果から見ると、鉄筋コンクリートで亀裂のないものはあまり著しい減衰を示さない。鉄骨鉄筋コンクリートにしても同様であろう。したがって、実際の高層建築にしても健全なものはあまり減衰しないと解釈して差し支えないと思う。その振動は不減衰性のものと見て大きな誤りはないであろう。

地動を受けた時の振動で最も都合が悪いのは共振（訳者注. 原文では「共鳴」）を起こした時で、振幅は刻々大きくなり、第 S 次固有振動と共振したものとすると、その振動は 1 周期ごとに

振幅は $\pi \cdot \beta_s \cdot u_s \cdot a_0$ ずつ

震度は $\pi \cdot \beta_s \cdot u_s \cdot K$ ずつ

増すことになる。ここに $\beta_s \cdot u_s$ は各次の固有振動曲線を合成して各点の振幅を 1 にするために第 S 次曲線のもつべき形である。また、 a_0 及び K はそれぞれ地動の振幅及び震度である（記号の詳細については前掲の拙著を参照）。

第 1 次振動と共振したものとすると、建物の頂点における振幅・震度は地動の振幅・震度の約 4 倍ずつ増えることになる。したがって、もし永く共振を続けるものとすれば、減衰の小さな建物はどのようにしても破壊を免れることはできない。次に、地動の周期が建物の固有周期よりかなり大きい場合は、永い振動が続いても振幅はあまり大きくなり、地盤とともに振動して、頂点の震度はおよそ地動の 2 倍前後になるであろう。一方、もし地動の周期の方が非常に小さい場合は震度はさほど大きくならない。

ここから一歩進めて、地震動を受けた建物の振動状態を見ていくことにする。まず、非常に剛な建物で周期（第 1 次固有周期の意味、以下同じ）が 0.2~0.8 秒くらいのものを考えると、地震の微振動と共振する場合も考えられるが、その時間がごく短いからあまり大きな力にはならないであろう。最も都合が悪い地震動として 0.5 秒前後の周期のところを考えてみると、その時の震度の分布は頂点において地震のその 3 倍くらいを予期しておかなければならない。周期 0.5 秒くらいの建物にとって最悪なのは周期 0.5 秒くらいの地動との共振であるが、幸いにも、この共振は波の 1 サイクルにも及ばないくらいだから、共振として 1 サイクルを考えておけば充分であろう。すると、頂点における震度は地動のその 4 から 5 倍を上回ることはないことになる（4 から 5 倍というところかなり大きいようだが、その時の地動の震度はあまり大きくないから大した値にはならない）。

次に周期 1 秒くらいの建物を考えてみるが、この場合は主要動において 2 から 3 サイクル分の共振を予想しないわけにはいかない。したがって、頂点における震度は地動の震度の約 10 倍くらいになる。さらに周期 2 秒くらいのものになると、かなり長時間の共振を予期しておかなければならない。したがって、上部の震度は非常に大きくなるものと考えざるをえない。最後に、周期 5 秒くらいの建物について考えてみる。この場合、第 1 次固有振動について言えば、周期の小さな地震動に対しては応答が小さく、大きな震度になることはないが、第 2 次固有振動が激しい地震動に共振するのではないかと思われる（第 1 次固有振動は主要動の終わり近くに共振することが予想されるが、震度の絶対値からいえば大したことにはならない）。ただし、第 1 次固有周期が 5 秒以上になる建物を造ることは実際問題として不可能であろう。

柔性構造の不安

真島博士は「耐震家屋構造の選択について」という論文で耐震構造に関する意見を公にした。その内容は、耐震構造として鉄筋コンクリート及び壁体を主とするものに対する不安を述べるとともに、鉄骨架構で壁体を従とする柔性構造を推奨し、あわせてそれに必要な条件を提案するという広範囲にわたるものである。その内容の基礎となっている振動理論を簡単に述べると次のようなものである。

破壊的な地震動の周期は 1 ないし 1.5 秒とのことである。だとすると、剛に造られた建物は必然的に地動以上の地震力を受けることになる。しかし第 1 次固有周期を十分に大きく、たとえば五重塔の固有周期とされる 1.5 秒以上になるようにし、さらに第 2 次固有周期を十分に小さくすれば、建物に作用する地震力は著しく小さくなる。したがって、剛性構造にして地震に抗うことを止め、柔性構造にして地震を避けるべきである。

しかし前述のとおり、この議論の根本をなしている地震動の周期に関する博士の考えは全く間違っているのである。周期を 2 秒とか 3 秒とかに造ることは、好んで長時間の共振を求め、震度の増大を招くことにほかならない。これは、博士が地震動の性質を全く誤解したために陥った誤謬で、もし博士が地震動の性質を正しく理解していれば、同じ理論から逆に柔性構造否定の結論を得たであろうと思う。

周期の大きな構造の不利は、先ごろの大震災における電灯の破壊によっても経験しているところである。震災予防調査会報告第 100 号丙の下巻にある堀越博士の紹介でも明らかなように、コードの長さが 2 尺くらい（固有周期が約 1.5 秒になる）の電灯は多くのものが破壊した。これは、地震によって振幅が増大して天井に当たってしまったためである。これによっても、周期の大きなものの共振の危険性が分かるであろう。このように、柔に造ったのでは長時間の共振、引いては振幅の増大を避けることは出来ないのだから、共振する可能性とその時間が少ない方、つまり剛へ剛へと進むこと以外に安全の途はないのである。

この点について我々の判断を誤らせた一つの原因は「五重塔の耐震性」に関する認識であった。

家屋の減衰性と耐震性

五重塔がその周期 1.5 秒前後（微動を与えた場合の大森博士の実験による）のものでありながら、いまだかつて倒壊した例がないのは謎であった。これに対しては種々の説明が試みられたが、その中でも、「長周期だから安全なのだ」という説明は当たっていないと思う。著者はこれをその減衰性によるものと解釈するのである。これに関する詳細な理論及び実験は、この秋に東京で開催された万国工業会議に提出した拙著「五重塔の耐震性について」の中で述べたとおりであるが、その概要を下に記す。

五重塔の耐震性について（抄）

関東大地震で多数の建物が倒壊または破損したが、五重塔はほとんど被害を受けなかった。歴史的に見ても、五重塔が地震で倒壊した例はない。安政の大地震で浅草の浅草寺の九輪は曲がったが、塔自体には異状がなかった。五重塔が他に例のない高さでありながらいまだに倒壊した例がないということは全く謎であった。

ある地震学者は、塔の心柱が地盤に固定せず上から吊り下げられているのを見て、心柱が振り子として作用することにより塔の振動を制御しているものと解釈した。しかし、日光・浅草にあるような心柱が吊り下げられたものはむしろ例外であって、多くのものは基礎の上に建っているのだから、この説明は当たらない。

故大森房吉博士は、塔を転倒させるだけの大きな振幅の地震がないからであると説明された。しかし、塔の周期が従来の破壊の大地震のそれになんか近いものであることを考えると、地震が小さくても、共振を起こせば、転倒したり途中で破損したりすることもあり得るわけである。著者は、五重塔が破壊しないのはその減衰の性質によってエネルギーを吸収し、振幅の増大を抑えることによるものであると信じている。

本論文はその説明を述べるものである。すなわち、

第一節では塔の構造を説明し各部寸法の概略を述べた。

第二節では内外の摩擦力を受ける構造物の振動理論を述べた。まず外部摩擦力は外部速度に比例し、内部摩擦力は構造物本体の速度に比例するとの仮定によって一般振動方程式を導き、その自由振動、及び基礎において運動を強制される時の強制振動の解をあげ、さらに地動を単弦振動とした時の振動を詳説した。

第三節では五重塔の木造模型についてその自由振動ならびに強制振動を実験的に研究した。第 1 次固有周期及び減衰率と強制振動時における振幅の増大の割合を調べることで、減衰時と共振時における振幅増大との関係が第二節で論じた減衰振動における関係とほとんど同一であることを知った。これによって、木造構造物の振動現象に第二節の振動法則が応用できることを確かめたのである。

第四節では五重塔の減衰が非常に大きいことを論じ、共振時の振動曲線を推定し、この振動により塔が破壊するために必要な地動の大きさに言及した。日光の五重塔に例をとり、これが破壊するためには共振時における地動の半振幅が 70cm 程度を超える必要があることを述べた。これを従来の大地震の半振幅に比べると非常に大きな差があり、ここから、五重塔が地震によって破壊しないことを証明したのである。

ようは「減衰性」なのである。

ここから、一般家屋の耐震構造方法として、それに「減衰性を与える」という方法はどうか、というアイディアが生まれてくるが、これに関して構造材料別に考察する。

木造：木造家屋の減衰性は極めて大きなものである。したがって地震に際し、共振によってとくに振幅が大きくなることはない。しかし筋かいのない家屋では相当のたわみが生じる。振動中にそのたわみに負けて破壊に至るものが出てくるのである。たわんでも破壊しない、というような柔にして強い構造を考えられれば地震で潰れない建物を造ることができる。しかしそんな労をとるよりも、むしろ初めから筋かいを豊富に使い、剛性構造として地震に対抗した方が簡単である。

鉄筋コンクリート造：その性質がきわめて剛であるから、減衰の多い柔な建物は造れない。したがって剛性構造にするより他に方法がない。ただし、剛に造った家屋が大地震によって亀裂を生じたような場合は減衰が現れて振幅の増大を阻止する効果があり、それによって倒壊を免れることはある。したがって、真島博士が「耐震構造の選択」中で案じられているほど不安なものではないと思う。ただし、亀裂の入った鉄筋コンクリート造はもはや健全なものとはいえないであろう。

鉄骨鉄筋コンクリート造（訳者注. 原文では「鉄筋コンクリート」とあるが、明らかな誤植と思われる。あるいは「鉄骨コンクリート」かもしれない）についても上と同様であろう。

鉄骨造：工場その他の作業場のように、鉄骨造で壁体に鉄板・メタルラス・木板等を用いるならば、柔でしかも減衰性

の大きな家屋を造ることが出来るであろう。しかし、これらは一般の家屋には向かない。

以上からして、今日の構造方法としては、鉄骨造・鉄筋コンクリート造あるいは木造の家屋にあっても、剛性構造によるより他に安全を確保できる途はないのである。

結

以上述べたように、耐震構造として絶縁構造は実現性にとぼしく、また柔性構造は地震動の誤解に基づくものなのでかえって不安がある。結局、実現性があるのは剛性構造だけである。現行の法令では各階に一律に水平震度 0.1 を加えて強度の最低限度を律している。これは取締り規則として実施の簡易を期する上で止むを得ないところであろうが、実際の設計においては、その地盤における地震動の性質を研究して震度を設定する、建物の重要さによって震度を増大させる、あるいは建物の頂部に行くにしたがって震度を増加させる、等のことを心掛けておきたいものである。